

На правах рукописи



КАРИМУЛЛИН Камиль Равкатович

**ДИНАМИКА ОПТИЧЕСКИХ СПЕКТРОВ ПРИМЕСНЫХ ЦЕНТРОВ
В КРИСТАЛЛИЧЕСКИХ И АМОРФНЫХ МАТРИЦАХ:
ИССЛЕДОВАНИЯ МЕТОДАМИ КОГЕРЕНТНОГО
И НЕКОГЕРЕНТНОГО ФОТОННОГО ЭХА**

01.04.05 – оптика

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата физико-математических наук

КАЗАНЬ – 2009

Работа выполнена на кафедре оптики и нанофотоники Государственного образовательного учреждения высшего профессионального образования «Казанский государственный университет им. В.И. Ульянова-Ленина» и в отделе молекулярной спектроскопии Учреждения Российской академии наук «Институт спектроскопии РАН»

Научный руководитель: доктор физико-математических наук, профессор
Виталий Владимирович Самарцев

Научный консультант: доктор физико-математических наук
Андрей Витальевич Наумов

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук, профессор
Александр Израилович Фишман

доктор физико-математических наук, профессор
Иван Иванович Попов

Ведущая организация: Самарский филиал Физического института
им. П.Н. Лебедева РАН

Защита состоится «17» декабря 2009 года в 14³⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 212.081.07 в Казанском государственном университете им. В.И. Ульянова-Ленина по адресу: 420008, г. Казань, ул. Кремлёвская, д. 18.

С диссертацией можно ознакомиться в Научной библиотеке им. Н.И. Лобачевского Казанского государственного университета.

Автореферат разослан « » 2009 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета
доктор физико-математических наук

Д.И. Камалова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Одним из важнейших факторов, способствовавших интенсивному развитию оптической спектроскопии, стало создание мощных источников монохроматического когерентного излучения – лазеров. Развитие лазерной техники тесно связано со спектроскопией примесных кристаллов. Спектроскопические исследования твердотельных сред, допированных редкоземельными ионами, стали основой для их применения в квантовой электронике. С открытием явления фотонного эха (в особенности долгоживущего эха) стали интенсивно развиваться такие области нестационарной лазерной спектроскопии и нелинейной оптики, как оптическая эхо-спектроскопия и когерентная оптическая обработка информации. Созданные на основе оптических переходных явлений запоминающие устройства и эхо-процессоры – это примеры конкретных разработок в области когерентной информатики.

Кристаллы, допированные трёхзарядными редкоземельными ионами, находят широкое применение в науке и технике. Современные разработки в данной области направлены на поиск новых активных сред для лазерной генерации в ультрафиолетовом диапазоне, новых оптических сцинтилляторов и преобразователей излучения. Особенности динамики некоторых спектральных переходов примесных центров в кристаллах, в частности, уникально большие времена фазовой релаксации, обусловили использование таких кристаллов в качестве носителей информации в оптических запоминающих устройствах и эхо-процессорах. Поэтому актуальность исследований динамики оптических спектров примесных твердотельных сред обусловлена интенсивным поиском новых носителей информации и оптимальных режимов функционирования устройств для когерентной оптической обработки информации.

Подавляющее большинство эхо-экспериментов выполняется в образцах с низкой концентрацией примеси, содержание которой обычно не превышает 1 ат.%. С увеличением концентрации внедрённых в кристаллическую матрицу ионов между ними возникает мультипольное взаимодействие, сопровождаемое уширением спектральных линий и тушением сигналов люминесценции. Несмотря на негативное (в основном) влияние увеличения степени допирования на динамику спектральных переходов, в некоторых случаях высокая

концентрация примеси может оказаться полезной. Очевидное преимущество использования высококонцентрированных кристаллов заключается в достижении большой оптической плотности, что особенно важно для систем квантовой памяти, а также при работе с тонкими образцами. Однако при высокой степени допирования концентрационное тушение начинает препятствовать надёжной регистрации сигналов фотонного эха, в связи с чем необходимо применять новые высокочувствительные методы детектирования слабых оптических откликов. *Первой целью диссертационного исследования* была разработка методики низкотемпературной оптической когерентной эхоспектроскопии высококонцентрированных примесных кристаллов.

Эксперименты по изучению динамики неупорядоченных (аморфных) сред также являются весьма актуальными и практически значимыми на сегодняшний день. Среды с отсутствием дальнего порядка в расположении атомов (молекул): разнообразные полимеры, органические стекла, полупроводниковые структуры, а также многочисленные биологические объекты, распространены повсеместно. Большинство нанообъектов, наноструктур органической природы и метаматериалов также относится к неупорядоченным соединениям. Синтез аморфных структур с заданными свойствами и создание на их основе новых приборов являются одними из важных направлений современной науки и техники. Повсеместное использование и необходимость в разработке новых материалов и структур на основе неупорядоченных органических веществ делают актуальным изучение их свойств. В данной работе оптические свойства аморфных соединений (полимеров) исследуется при помощи спектроскопии некогерентного фотонного эха. Примесные центры, а именно – хромофорные молекулы, внедряемые в малой концентрации в аморфные матрицы, играют в данном случае роль чувствительных спектральных зондов.

Большинство экспериментальных исследований оптических спектров примесных молекул в аморфных соединениях выполняется при криогенных температурах. Это связано с простотой процедуры интерпретации данных низкотемпературных экспериментов и возможностью исследования иерархии процессов, вносящих вклад в динамику спектральных переходов и последовательно активизирующихся с ростом температуры. Вместе с тем, проблема исследования свойств неупорядоченных веществ в области промежуточных и особенно в области высоких (вплоть до комнатных и выше) температур остаётся весьма важной задачей. Развитие методов

высокотемпературной спектроскопии аморфных сред во многом определяет дальнейший прогресс как в области фундаментальных исследований, так и в области практических приложений, связанных с созданием твердотельных материалов с заданными свойствами и с изучением биологических объектов. **Второй целью диссертационного исследования** стала разработка методики высокотемпературной спектроскопии аморфных сред в режиме некогерентного фотонного эха.

Практическая и научная значимость

Результаты исследований по оптической когерентной эхо-спектроскопии примесных кристаллов могут рассматриваться в качестве рекомендаций при создании устройств оптической памяти большой ёмкости и высокопроизводительных процессоров на основе явления фотонного эха. Разработки в области некогерентной оптической эхо-спектроскопии неупорядоченных сред при высоких температурах могут быть использованы для построения систем неразрушающего контроля и диагностики, например, для исследования быстропротекающих процессов в биологических средах.

Научная новизна полученных результатов заключается в следующем:

1. Впервые на примере кристалла алюмо-иттриевого граната детектированы и исследованы сигналы первичного, стимулированного и аккумулированного фотонного эха в кристалле с высокой (10 ат.%) концентрацией примесных ионов. Проведение таких экспериментов стало возможным благодаря созданию низкотемпературного оптического эхо-релаксометра, функционирующего в режиме счёта фотонов.

2. Впервые методом четырёхволнового смешения с использованием некогерентного лазерного источника исследована температурная зависимость однородной ширины полосы спектрального перехода S_1-S_0 молекул тетра-tert-бутилтеррилена в матрице полиизобутилена в диапазоне температур от 77,3 до 300 К.

3. Впервые методика некогерентного фотонного эха применена для исследования высокотемпературной динамики оптических спектров примесных аморфных сред в условиях повышенного внешнего гидростатического давления.

Основные положения, выносимые на защиту

1. Высокая степень допирования кристаллов, несмотря на наличие сильного концентрационного тушения оптических откликов, позволяет получать материалы с заданными спектральными свойствами и управлять параметрами фазовой релаксации примесных ионов. Созданный низкотемпературный оптический эхо-релаксометр, функционирующий в режиме счёта фотонов, позволяет исследовать сигналы фотонного эха в высококонцентрированных активированных кристаллах типа YAG:Tm^{3+} с содержанием примесных ионов до 10 ат. %.

2. Основной вклад в однородное уширение спектрального перехода S_1-S_0 молекул тетра-tert-бутил-террилена в матрице полиизобутилена при температурах от 77,3 до 300 К вносит взаимодействие примесных центров с акустическими фононами. Переход к данному механизму уширения от механизма, обусловленного взаимодействием хромофорных молекул с квазилокализованными колебательными возбуждениями матрицы, происходит при температуре $T_{tr}=25$ К.

3. Спектроскопия некогерентного фотонного эха в хромофорных молекулах, внедрённых в полимерные матрицы в качестве спектральных зондов, позволяет исследовать оптические свойства этих матриц при высоких температурах и повышенном давлении. Созданная экспериментальная установка по контролю и измерению давления позволяет исследовать высокотемпературную динамику оптических спектров в примесных аморфных соединениях при высоком давлении.

Достоверность полученных результатов обеспечивается надёжностью и корректностью используемых экспериментальных методов, тщательностью исполнения экспериментов и обработки полученных экспериментальных данных, а также воспроизводимостью результатов.

Апробация работы

Результаты исследований по теме диссертации докладывались на всероссийских и международных конференциях, симпозиумах и научных школах: VII Всероссийская и VIII-XIII Международные молодёжные научные школы «Когерентная оптика и оптическая спектроскопия» (Казань, 2003-2009 г.г.), VII и VIII Международный симпозиум по фотонному эху и когерентной

спектроскопии (PECS-2005, Калининград и PECS-2009, Казань), X Международные чтения по квантовой оптике (IWQO-2007, Самара), XI и XII Всероссийская школа-семинар «Физика и применение микроволн» и XI Всероссийская школа-семинар «Волновые явления в неоднородных средах» (Звенигород, 2007-2009 г.г.), II-IV Международные научные школы «Наука и инновации» (Йошкар-Ола, 2007-2009 г.г.), XVI Международный симпозиум по молекулярной спектроскопии высокого разрешения (HighRus-2009, Иркутск, 2009 г.), а также на VII и VIII научных конференциях молодых учёных, аспирантов и студентов НОЦ КГУ «Материалы и технологии XXI века» (2007 и 2008 г.г.), итоговых научных конференциях Казанского государственного университета, семинарах отдела молекулярной спектроскопии Института спектроскопии РАН, семинарах лаборатории нелинейной оптики и итоговых научных конференциях Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского КазНЦ РАН (2005-2008 г.г.).

По материалам диссертации опубликовано 29 печатных работ, из них 8 статей в центральной печати, 21 публикация в сборниках трудов конференций и других рецензируемых изданиях.

Личный вклад автора

Разработка, создание и модификация экспериментальной аппаратуры, проведение экспериментальных исследований, интерпретация, обработка и анализ полученных результатов осуществлялись автором самостоятельно либо при его непосредственном участии. В большинстве совместных работ автором диссертации выполнена основная часть исследований.

Структура и объём работы

Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка цитированной литературы и приложения. Общий объём диссертационной работы составляет 160 страниц машинописного текста, включая 50 рисунков, 1 таблицу и список цитированной литературы из 236 наименований.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во введении указана и обоснована актуальность выбранной научной темы и её направленность, сформулирована цель диссертации и её основные задачи,

приведены защищаемые научные положения, отмечена новизна и практическая значимость полученных результатов.

В первой главе описываются основные особенности оптических спектров и динамики спектральных переходов примесных центров в кристаллах и неупорядоченных средах. Рассматривается спектроскопия кристаллов, допированных редкоземельными ионами и приводится обзор литературы по существующим методам и основным результатам исследований оптических спектров примесных центров в кристаллических матрицах. Кроме того глава 1 посвящена особенностям внутренней динамики неупорядоченных твердотельных сред. Рассмотрены специфические низкоэнергетические возбуждения, присущие аморфным системам, и проанализировано их влияние на спектры примесных хромофорных молекул. Приводится обзор методов исследования динамики оптических спектров примесных центров в аморфных матрицах и их основных результатов.

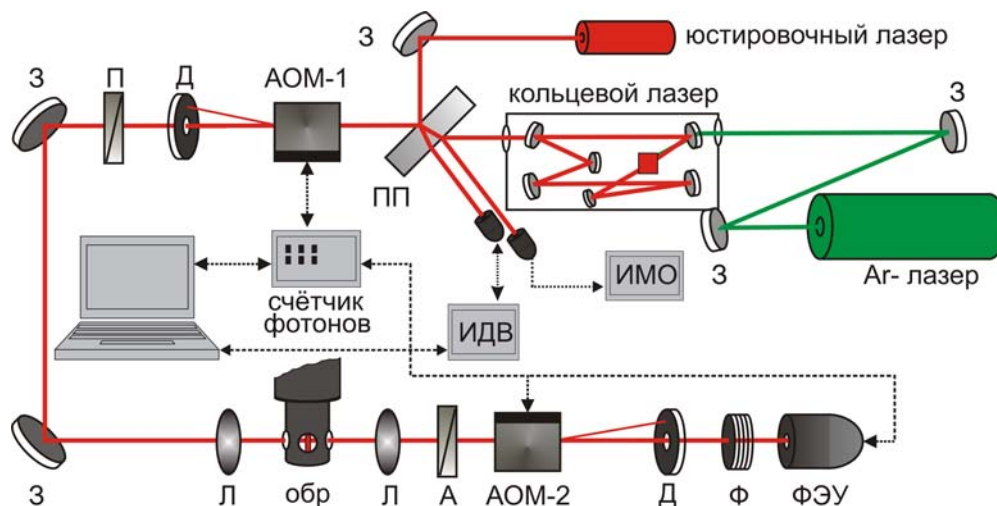


Рис. 1. Блок-схема экспериментальной установки «оптический эхо-процессор». Обозначения: З – зеркало со 100%-отражением, ПП – полупрозрачная пластина, Л – линза, Д – диафрагма, Ф – блок ослабителей (светофильтров), П – поляризатор, А – анализатор, ФЭУ – фотоэлектронный умножитель, АОМ – акустооптический модулятор, ИМО – измеритель мощности излучения, ИДВ – спектрометр длин волн, обр – образец в оптическом криостате.

Вторая глава содержит описание экспериментальных установок, которые использовались в исследованиях твердотельных примесных сред методами когерентного и некогерентного фотонного эха.

Описан импульсный эхо-спектрометр на основе лазера на красителе и созданная при непосредственном участии автора экспериментальная установка по фотонному эху – «оптический эхо-процессор». Схема установки показана на

рис. 1. Отличительной особенностью созданного эхо-спектрометра является система детектирования слабых оптических эхо-откликов, работающая в режиме счёта фотонов. Подробно рассматривается высокочувствительный метод детектирования слабых оптических откликов.

Описаны спектрометр некогерентного фотонного эха, а также конфокальный люминесцентный микроскоп-спектрометр, созданный автором и предназначенный для контроля и измерения внешнего гидростатического давления в исследованиях неупорядоченных примесных сред под давлением. Основным элементом некогерентного эхо-спектрометра является широкополосный шумовой (некогерентный) лазер на красителе с поперечной накачкой, построенный по безрезонаторной схеме. Спектр излучения такого лазера определяется спектром люминесценции используемого красителя и не имеет модовой структуры. Для регистрации сигналов фотонного эха используется высокочувствительная охлаждаемая ПЗС-камера с внутренним размножением электронов PCO SensiCam EM.

Для постановки экспериментов по исследованию динамики спектров примесных неупорядоченных сред при больших давлениях была разработана, создана и апробирована в эксперименте оптическая камера высокого давления. Камера представляет собой устройство, при помощи которого небольшое количество исследуемого образца сдавливается внутри гаскеты (медной либо латунной прокладки с отверстием), зажатой между двух сапфировых наковален. Наковальни вкладываются внутрь металлических цилиндров, которые прижимаются друг к другу при помощи микрометрических винтов. Максимальное развиваемое в камере давление составляет около 3 ГПа.

На рис. 2 представлена схема конфокального микроскопа – спектрометра, предназначенного для измерения давления в камере высокого давления по сдвигам спектров флуоресценции микрокристаллов рубина, внедрённых в исследуемый образец. Измерение давления основано на регистрации изменения расстояния между линиями в дублете флуоресцентного излучения рубина с центральной длиной волны $\lambda=692,76$ нм при варьировании давления. Давление определяется либо по сдвигу линий, либо по величине расщепления дублета. Чувствительная ПЗС-матрица позволяет регистрировать сигнал флуоресценции кристаллов размером менее микрометра. По рассчитанным спектральным параметрам дублета рубина определяется давление, прикладываемое к образцу, с относительной погрешностью не более 50 МПа. При помощи дополнительных

элементов (делительной пластины, объектива на микрометрической подвижке и web-камеры) можно прецизионно перемещать образец, визуально контролируя положение микрокристаллов рубина в поле зрения микроскопа.

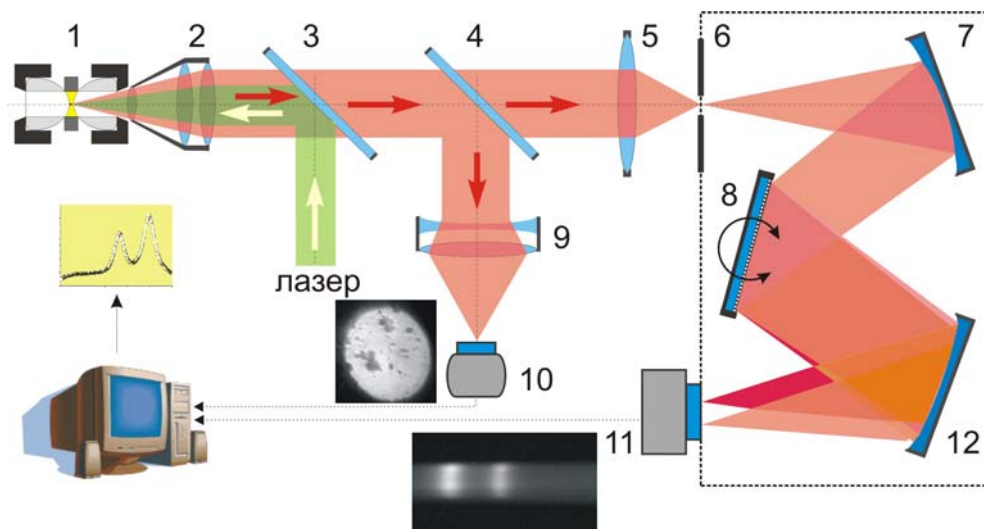


Рис. 2. Принципиальная схема установки для измерения давления в камере высокого давления. 1 – образец с внедренным в него микрокристаллом рубина, помещенный в камеру высокого давления; 2 – объектив для фокусировки лазерного излучения на микрокристалле; 3 и 4 – светоделительные пластинки; 5 – фокусирующая линза; 6 – входная щель спектрометра; 7 – входное зеркало спектрометра; 8 – дифракционная решетка; 9 – объектив; 10 – web-камера для регистрации положения микрокристалла рубина в образце и фокусировки на нём лазерного излучения (слева – пример изображения с камеры); 11 – чувствительная ПЗС-камера для регистрации спектра люминесценции микрокристалла рубина (слева – пример регистрации дублета); 12 – выходное зеркало спектрометра.

В третьей главе рассмотрена методика оптической когерентной эхо-спектроскопии и приведены результаты по исследованию фотонного эха в кристаллах с высоким содержанием примеси. Дано описание различных видов сигналов фотонного эха и экспериментальных методов оптической когерентной эхо-спектроскопии, обоснован выбор объектов исследования – примесных кристаллов, активированных трёхзарядными ионами тулия, приведены результаты спектроскопического исследования образцов.

Описывается эксперимент по оптической когерентной эхо-спектроскопии кристалла алюмо-иттриевого граната с высоким содержанием примесных ионов тулия. Сигналы первичного, стимулированного и аккумулярованного эха возбуждались на длине волны 793,15 нм на переходе ${}^3\text{H}_6(1) \rightarrow {}^3\text{H}_4(1)$. Кривая спада сигнала первичного фотонного эха показана на рис. 3.

Спад является неэкспоненциальным и описывается формулой $I(\tau_{12}) \sim \exp[-(4\tau_{12}/T_M)^x]$, впервые предложенной Мимсом [1] в теории электронного спинового резонанса. Здесь T_M – время фазовой памяти, а x –

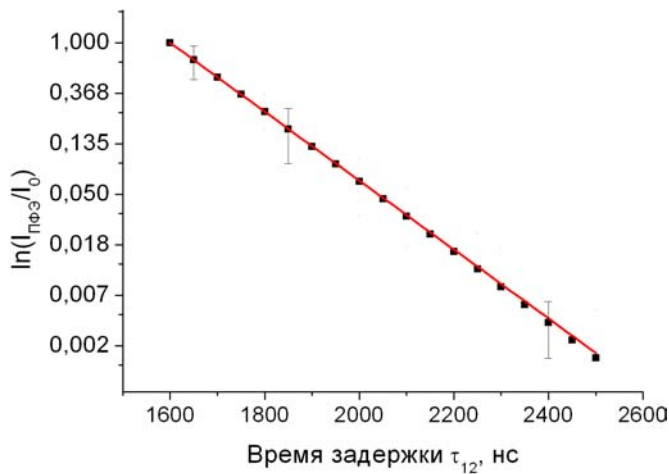


Рис. 3. Зависимость логарифма интенсивности сигналов первичного фотонного эха от величины задержки между первым и вторым возбуждающими импульсами (квадраты) и аппроксимация этой зависимости функцией $I(\tau_{12}) = A \exp[-(4\tau_{12}/T_M)^x]$, где $T_M = 0,75 \pm 0,13$ мкс и $x = 1,07 \pm 0,25$ (сплошная линия).

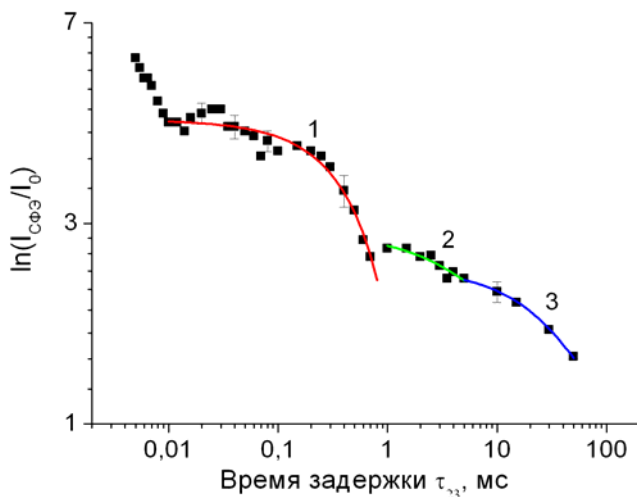


Рис. 4. Зависимость логарифма интенсивности сигналов стимулированного фотонного эха от величины задержки между вторым и третьим возбуждающими импульсами и аппроксимация этой зависимости экспоненциальными функциями (сплошные линии).

показатель экспоненты, который зависит от особенностей динамики ядерных спинов. В нашем кристалле, содержащем 10 ат.% примесных ионов тулия, спад описывается следующими параметрами: $T_M = 0,75 \pm 0,13$ мкс и $x = 1,07 \pm 0,25$.

Спад сигналов первичного фотонного эха при низких концентрациях допанта носит обычно неэкспоненциальный характер (в кристалле YAG с концентрацией ионов тулия $C = 0,17$ ат.% $T_M = 75$ мкс и $x = 1,5$ [2]). Эта неэкспоненциальность связана с «эффектом замораживания ядра» (в англоязычной литературе принят термин «frozen core effect»). Эффект замораживания ядерных спинов, заметно влияет на примесный центр в том случае, когда последний обладает магнитным моментом, много большим чем момент ядерных спинов ионов матрицы. Большое значение момента приводит к расстройке ядерных спинов лигандов, препятствуя взаимным переворотам их спинов. При этом флуктуирующее локальное поле в

местоположениях примесных ионов обуславливается разбросом времён переворотов спинов (от десятков миллисекунд для ионов на границе замороженного ядра до тысяч миллисекунд для ионов, ближайших к примесному центру). Характеристический размер замороженного ядра определяется тем условием, что взаимодействие примесного иона с ядром иона матрицы на границе по интенсивности такое же, что для двух соседних ядерных спинов вблизи границы такого ядра. Эта ситуация приводит к спектральной диффузии и к неэкспоненциальному характеру спадов сигналов эха, такому же, что был описан для электронных спинов Мимсом [1]. С ростом концентрации ионов примеси среднее расстояние между ними уменьшается, так что влияние примесных центров на спиновую динамику становится всё более однородным (одинаковым для всех спинов). В эксперименте с высококонцентрированным кристаллом спад практически экспоненциальный, поэтому можно говорить о том, что в кристаллах с высокой концентрацией примеси «эффект замораживания ядра» значительно подавляется. В данной работе на примере кристалла граната с высокой концентрацией примесных ионов тулия показана возможность получения твердотельных сред с заданными спектральными свойствами и параметрами фазовой релаксации.

Кривая спада сигнала стимулированного фотонного эха, изображённая на рис. 4, имеет несколько изломов, что является одним из признаков формирования в образце долгоживущего эха. Для наглядности по оси абсцисс отложено время задержки между вторым и третьим импульсами в логарифмическом масштабе. Такое представление данных позволяет разделить вклады в кривую спада от процессов с разными временными масштабами. Данная кривая была аппроксимирована экспоненциальными зависимостями (сплошные линии 1, 2 и 3 на рис. 4), с характеристическими временами спада: 600 мкс, 30 мс и 100 мс. Первое время спада – это время жизни возбуждённого состояния $^3\text{H}_4(1)$ рассматриваемого перехода, оно практически совпадает со значением 590 мкс, наблюдавшимся в работе [2]. Второе характеристическое время соответствует времени жизни метастабильного уровня $^3\text{F}_4$, который заселяется благодаря быстрому переходу электронной плотности (спаду) из возбуждённого состояния. Третий, самый долгий спад, обязан взаимодействию ядерных спинов тулия и алюминия матрицы и хорошо согласуется со значением времени спада 90 мс, полученным в работе [3]. Модуляция на временном

участке 1 также свидетельствует об интенсивном сверхтонком взаимодействии ядерных спинов тулия.

Глава 3 также содержит описание метода численного моделирования когерентных оптических переходных процессов и его приложения для интерпретации провалов, наблюдаемых в спектрах сигналов первичного и стимулированного фотонного эха в кристалле трифторида лантана с празеодимом и в рубине.

Четвёртая глава посвящена методике некогерентного фотонного эха и её приложению для исследования оптических спектров хромофорных молекул, внедрённых в аморфные матрицы различных полимеров в качестве чувствительных спектральных зондов. Рассматривается спектроскопия фотонного эха и четырёхволнового смешения с использованием некогерентных лазерных источников, описывается методика приготовления образцов – примесных полимерных плёнок и методика измерения сверхкоротких времён фазовой релаксации при высоких температурах по кривым спада сигналов четырёхволнового смешения.

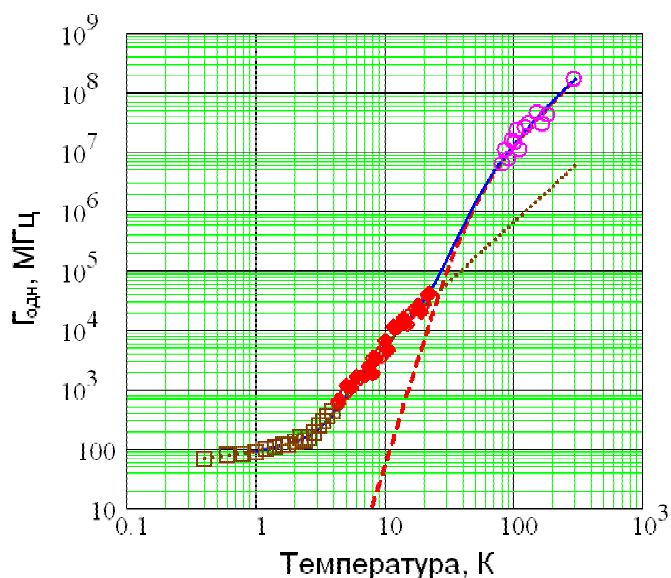


Рис. 5. Температурная зависимость однородной ширины спектральной линии перехода S_0-S_1 молекул тетра-tert-бутил-террилена в матрице полиизобутилена в диапазоне температур от 0,35 до 300 К измеренная методами фотонного эха. Квадраты – данные по двухимпульсному, а ромбы и кружки – по некогерентному фотонному эху.

В данной главе приводятся результаты измерений при комнатной температуре времён сверхбыстрой фазовой релаксации в примесных полимерах. С использованием развитой методики высокотемпературных измерений исследована температурная зависимость однородной ширины линии перехода S_0-S_1 хромофорных молекул тетра-tert-бутил-террилена в матрице полиизобутилена в диапазоне температур 77,3–300 К (см. рис. 5).

Наблюдаемая зависимость интерпретирована в рамках динамической теории оптической дефазировки в твердотельных средах в дебаевском приближении

и проведено сравнение полученных результатов с данными низкотемпературных экспериментов. Установлено, что при высоких температурах основной вклад в однородное уширение спектра хромофорных молекул вносит их взаимодействие с акустическими фононами матрицы. Из анализа температурной зависимости определена температура $T_{tr}=25$ К перехода от механизма оптической дефазировки, обусловленного взаимодействием хромофорных молекул с квазилокализованными колебательными возбуждениями матрицы, к механизму, вызванному взаимодействием хромофоров с дебаевским спектром акустических фононов.

В заключительном параграфе главы описаны эксперименты по исследованию спектров примесных аморфных сред под давлением. Экспериментально показано, что в условиях повышенного давления время фазовой релаксации хромофорных молекул в полимерных матрицах значительно увеличивается.

В заключении приводятся основные результаты и наиболее существенные выводы из материалов исследования.

Основные результаты и выводы

1. Создан низкотемпературный эхо-релаксометр, предназначенный для исследований в области оптической эхо-спектроскопии и когерентной оптической обработки информации. Отличительной особенностью данного комплекса экспериментальной аппаратуры является возможность детектировать слабые оптические отклики в режиме счёта фотонов.

2. Обнаружены и исследованы сигналы первичного, стимулированного и аккумулярованного фотонного эха в кристалле алюмоиттриевого граната с высоким (10 ат.%) содержанием примесных ионов тулия. Измерены время фазовой памяти ($T_M = 0,75$ мкс) и времена жизни возбуждённого ($T_1(^3\text{H}_4)=600$ мкс) и метастабильного ($T_1(^3\text{F}_4)=30$ мс) уровней. На примере кристалла граната с высокой концентрацией примесных ионов тулия показана возможность получения материалов с заданными параметрами фазовой релаксации.

3. Методами численного моделирования интерпретировано возникновение провалов в спектрах сигналов фотонного эха в кристалле трифторида лантана с ионами празеодима и в рубине.

4. Методом некогерентного фотонного эха и четырёхволнового смешения измерены при комнатной температуре времена сверхбыстрой фазовой релаксации молекул-хромофоров (указаны в скобках) в аморфных полимерах: полиметилметакрилате (родамин-101, тетра-tert-бутилтеррилен), полиизобутилене (тетра-tert-бутилтеррилен) и поливинилацетате (стирил-9М).

5. Исследована зависимость однородной ширины спектральной линии перехода S_0-S_1 молекул тетра-tert-бутилтеррилена в полиизобутилене в диапазоне температур от 77,3 до 300 К. Определена температура $T_{tr}=25$ К, в которой наблюдается изменение механизма оптической дефазировки. Ниже этой температуры дефазировка обусловлена взаимодействием хромофорных молекул с квазилокализованными колебательными возбуждениями матрицы, а выше – взаимодействием хромофоров с дебаевским спектром акустических фононов.

6. Разработана и создана камера высокого давления, предназначенная для исследования динамики оптических спектров полимерных плёнок в диапазоне температур 1,8–300 К при давлениях до 3 ГПа. Создан конфокальный люминесцентный микроскоп-спектрометр, позволяющий по спектрам флуоресценции микрокристаллов рубина, внедрённых в исследуемый образец, измерять высокое давление в камере.

7. Показано, что в условиях повышенного давления ($\sim 1,0$ – $1,5$ ГПа) время фазовой релаксации хромофорных молекул в полимерных матрицах значительно увеличивается.

Публикации

в центральной научной печати:

K1. Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Христофорова Д.А., Самарцев В.В. О возможности использования кристаллов, допированных трехзарядными ионами тулия, в фотонных эхо-процессорах / Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. 2007. Т. 149. Кн. 1. С. 64-71.

K2. Samartsev V.V., Shegeda A.M., Shkalikov A.V., Karimullin K.R., Mitrofanova T.G., Zuikov V.A. Incoherent backward photon echo in ruby upon excitation through an optical fiber / Laser Physics Letters. 2007. V. 4, № 7. P. 534-537.

К3. Зуйков В.А., Каримуллин К.Р., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В., Шегеда А.М., Шкаликов А.В. Некогерентное фотонное эхо в спектроскопии примесных оптически плотных сред / Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72, № 1. С. 67-72.

К4. Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В., Самарцев В.В. Сверхбыстрая оптическая дефазировка в примесном полиметилметакрилате: исследования методом некогерентного фотонного эха с фемтосекундным временным разрешением / Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. 2008. Т. 150. Кн. 2. С. 148-159.

К5. Kalachev A.A., Karimullin K.R., Samartsev V.V., Zuikov V.A. Optical echo-spectroscopy of highly doped Tm:YAG / Laser Physics Letters. 2008. V. 5, № 12. P. 882-886.

К6. Каримуллин К.Р., Калачёв А.А., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Оптическая эхо-спектроскопия высококонцентрированного кристалла YAG:Tm³⁺ / Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. 2008. Т. 151. Кн. 1. С. 111-120.

К7. Тиранов А.Д., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В. Численное моделирование фотонного эха в двухуровневой среде / Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. 2008. Т. 151. Кн. 1. С. 197-203.

К8. Зуйков В.А., Калачёв А.А., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В., Тиранов А.Д. Формирование сигналов фотонного эха в условиях сильного концентрационного тушения / Известия РАН. Серия физическая. 2009. Т. 73, № 12. С. 1774-1779.

в сборниках трудов всероссийских и международных научных конференций и других рецензируемых изданиях:

К9. Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Экспериментальная установка «Оптический эхо-процессор» / Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. 2004. Вып. VIII. С. 301-308.

К10. Karimullin K.R. Registration of the photon echo signals under the photon counting mode / Proceedings of SPIE. 2006. V. 6181. P. 61810I [12 pages].

K11. Каримуллин К.Р. Регистрация слабых световых сигналов в режиме счета фотонов / Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. 2005. Вып. IX. С. 201-204.

K12. Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Детектирование световых импульсов в режиме счета фотонов / Ученые записки Казанского государственного университета. Серия физико-математические науки. 2006. Т. 148. Кн. 1. С. 135-141.

K13. Каримуллин К.Р., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Спектроскопическое исследование перспективных носителей оптической информации / Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. 2006. Вып. X. С. 177-180.

K14. Зуйков В.А., Каримуллин К.Р., Латыпов И.З., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В., Шегеда А.М., Шкаликов А.В. Некогерентное фотонное эхо в рубине / Физика и применение микроволн. 2007. Вып. XI. Часть 4. С. 65-67.

K15. Каримуллин К.Р. Система дистанционной диагностики на основе некогерентного фотонного эха / Наука и инновации. 2007. Вып. II. С. 147-151.

K16. Зуйков В.А., Каримуллин К.Р., Митрофанова Т.Г., Самарцев В.В., Шегеда А.М., Шкаликов А.В. Некогерентное фотонное эхо в рубине / Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского 2007. Ежегодник. Казань:ФизтехПресс, 2008. С. 116-119.

K17. Zuiikov V.A., Karimullin K.R., Mitrofanova T.G., Samartsev V.V., Shegeda A.M., Shkalikov A.V. Incoherently generated photon echo in a crystal of ruby using fiber optical delay line / Proceedings of SPIE. 2008. V. 7024. P. 70240J [12 pages].

K18. Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В. Исследование сверхбыстрой фазовой релаксации в примесном полиметилметакрилате методом некогерентного эха с фемтосекундным временным разрешением / Волновые явления в неоднородных средах. 2008. Вып. XI. Часть 4. С. 37-39.

K19. Каримуллин К.Р. Когерентное и некогерентное фотонное эхо и пути решения научно-инновационных задач по спектроскопии биологических объектов / Наука и инновации. 2008. Вып. III. С. 191-195.

K20. Каримуллин К.Р., Калачёв А.А., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Особенности сигналов фотонного эха в кристалле граната с высоким содержанием ионов тулия / Наука и инновации. 2008. Вып. III. С. 62-66.

K21. Каримуллин К.Р., Калачёв А.А., Зуйков В.А., Самарцев В.В. Фотонное эхо в алюмоиттриевом гранате с высокой концентрацией примесных ионов

тулия / Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. 2008. Вып. XII. С. 238-241.

К22. Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В. Метод измерения давления на основе микроскопии флуоресценции микрокристалла рубина / Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. 2008. Вып. XII. С. 242-245.

К23. Тиранов А.Д., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В. Моделирование явления фотонного эха при резонансном воздействии последовательности лазерных импульсов на двухуровневую систему / Когерентная оптика и оптическая спектроскопия. 2008. Вып. XII. С. 212-215.

К24. Зуйков В.А., Калачёв А.А., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В. Эхоспектроскопия алюмоиттриевого граната с высоким содержанием ионов тулия / Казанский физико-технический институт имени Е.К. Завойского 2008. Ежегодник. Казань:ФизтехПресс, 2009. С. 140-143.

К25. Зуйков В.А., Калачёв А.А., Каримуллин К.Р., Самарцев В.В., Тиранов А.Д. Особенности формирования сигналов фотонного эха в условиях сильного концентрационного тушения / Физика и применение микроволн. 2009. Вып. XII. Часть 4. С. 16-18.

К26. Каримуллин К.Р., Вайнер Ю.Г., Ерёмчев И.Ю., Наумов А.В. Измерение давления методом микроспектроскопии флуоресценции рубиновых зондов / Физика и применение микроволн. 2009. Вып. XII. Часть 4. С. 51-53.

К27. Каримуллин К.Р. Исследование быстрой релаксационной динамики в аморфных примесных средах методом некогерентного фотонного эха / Структура и динамика молекулярных систем. 2009. Вып. XVI.

К28. Каримуллин К.Р. К вопросу об определении параметров фазовой релаксации по спадам сигналов четырехволнового смешения в спектроскопии примесных полимеров методом некогерентного фотонного эха / Наука и инновации. 2009. Вып. IV. С. 72-78.

К29. Karimullin K.R., Vainer Yu.G., Naumov A.V., Yeremchev I.Yu. Ultrafast relaxation dynamics in doped polymers: study by means of incoherent photon echo with femtosecond time-domain resolution / High resolution molecular spectroscopy. 2009. Iss. XVI. P. 173.

Список цитированной литературы

1. Mims W.B. Phase memory in electron spin echoes, lattice relaxation effects in $\text{CaWO}_4\text{:Er, Cr, Mn}$ / Phys. Rev. 1968. V. 168, № 2. P. 370-389.
2. Macfarlane R.M. Photon-echo measurements on the trivalent thulium ion / Opt. Lett. 1993. V. 18, № 22. P. 1958.
3. Strickland N.M., Sellin P.B., Sun Y., Carlsten J.L., Cone R.L. Laser frequency stabilization using regenerative spectral hole burning / Phys. Rev. B. 2000. V. 62, № 3. P. 1473-1476.